秸秆还田替代化学钾肥对喀斯特峰丛洼地春玉米产量及土壤钾素的影响

傅伟[(1,2)];刘坤平[(1,2)];陈洪松[(1,2)];陈香碧[(1,2)];林海飞[(1,2)];张伟[(1,2)];王克林[(1,2)]

(1). 中国科学院亚热带农业生态研究所/亚热带农业生态过程重点实验室　长沙　410125; (2). 中国科学院环江喀斯特生态系统观测研究站　环江　547100

摘　要: 基于中国科学院环江喀斯特站2006年开展的玉米/大豆套作长期定位施肥试验, 利用2010—2014年监测数据, 研究等量氮磷钾投入条件下, 不同处理[对照(不施肥, CK)、全量化肥(NPK)、秸秆还田替代30%化肥钾(C7S3)、秸秆还田替代60%化肥钾(C4S6)]间秸秆还田与化肥施用的效果差异, 以期为喀斯特峰丛洼地农田生态利用秸秆还田替代化肥量提供科学依据。结果表明: 1)施肥处理5年春玉米平均产量是不施肥处理的4.12~4.17倍, C7S3和C4S6处理产量分别是NPK处理的98.3%和98.7%, 施肥处理玉米产量及秸秆量均随时间呈增长趋势。2)施肥使玉米秸秆中含钾量、春玉米籽粒吸收氮磷钾量均显著高于不施肥处理, 但施肥处理间无显著差异(P>0.05)。3)在钾素回收率、钾素吸收利用率、钾肥农学利用率以及钾肥偏生产力方面, C7S3和C4S6处理与全量化肥NPK处理间均无显著差异(P>0.05)。4)NPK处理年均钾素盈余量为3.00 kg·hm^{-2}, 高于C7S3处理(–1.90 kg·hm^{-2}), 而C4S6处理钾素年均盈余量最大, 为8.22 kg·hm^{-2}, 实际平衡盈余率为7.4%。5)与试验初期相比, 不施肥处理土壤速效钾含量下降了15.9%, 施肥处理极显著增加了土壤中速效钾含量(P<0.01); 5年间施肥处理间年均速效钾含量增幅大小依次为: NPK>C7S3>C4S6, 各处理间差异不显著(P>0.05)。6)经过8年耕作, 土壤缓效钾表现为不施肥处理中呈10.9%的下降趋势; C4S6处理中则有不超过5%(为4.9%)的降幅; 化肥NPK处理中基本持平, 增幅1.3%; C7S3处理中达22.4%的较大增幅。综上所述, 秸秆还田替代部分化肥钾的施肥措施运用在喀斯特峰丛洼地可保持春玉米较高产量的同时, 还能维持土壤钾素动态平衡; 其中60%秸秆钾替代量更有利于维持钾素表观平衡, 而30%的秸秆钾还田量则更有利于土壤缓效钾的积累。

关键词: 秸秆还田; 替代效应; 喀斯特峰丛洼地; 钾素平衡; 玉米产量

中图分类号: S-3　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1671-3990(2017)12-0000-00

Effect of replacement in potassium with straw returning on spring maize yield and soil potassium balance in karst peak-cluster depression*

FU Wei[1,2], LIU Kunping[1,2], CHEN Hongsong[1,2], CHEN Xiangbi[1,2], LIN Haifei[1,2], ZHANG Wei[1,2], WANG Kelin[1,2**]

(1. Institute of Subtropical Agriculture, Chinese Academy of Sciences / Key Laboratory of Agro-ecological Processes in Subtropical Region, Chinese Academy of Sciences, Changsha 410125, China; 2. Huanjiang Observation and Research Station for Karst Ecosystems, Chinese Academy of Sciences, Huanjiang 547100, China)

Abstract: Based on a long-term experiment on maize-soybean relay intercropping system in Huanjiang Observation and Research Station for Karst Ecosystem, Chinese Academy of Sciences, the effects of straw in place of chemical potassium on the yield of spring maize and soil potassium balance were investigated, aiming to provide scientific basis for the rational use of straw and fertilizer in karst peak-cluster depression. The experiment was started in 2006, and the data were collected during 2010−2014. Four treatments with four repetitions were discussed in this study, including CK (no fertilizer), NPK (chemical fertilizer), C7S3 (in which 30% K from the straw and 70% K from the chemical fertilizer.), C4S6 (60% K from the straw and 30% from the chemical fertilizer). The results showed that: (1) the annual yields of spring maize in fertilization treatments during the 5 years were 4.12 ~ 4.17 times than that in no fertilizer treatment. The corn yields in C7S3 and C4S6 were 98.3% and 98.7% of that in NPK, respectively. The yields of grain and straw increased with time on. (2) compared with CK, fertilization application could significantly increase the K amount in maize straw with 2.21 ~ 2.53 times than that in CK. And fertilization application could significantly increase N, P and K absorption amounts in maize grain (P < 0.01), but there was no significant difference among fertilizer treatments (P > 0.05). (3) there were no significant differences for recovery efficiency, absorption efficiency, agronomic efficiency and partial factor productivity for potassium during the NPK, C7S3 and C4S6 treatments. (4) the annual surplus amount of potassium in NPK was 3.00 kg·hm^{-2}, which was higher than that in C7S3 (with minus 1.90 kg·hm^{-2}). The most annual surplus amount of potassium appeared in C4S6, with 8.22 kg·hm^{-2}, and the Surplus of potassium was 7.4%. (5) Compared to the beginning of the experiment(2006), soil rapidly available potassium declined by 15.9% in 2014; The fertilization application significantly increased the amount of rapidly available potassium

($P < 0.01$). The orders of annual amount of rapidly available potassium during 2010 ~ 2014 in fertilizer treatments were that: NPK > C7S3 > C4S6, with no difference in treatments ($P > 0.05$).⑹ after eight years of cultivation, soil slowly available potassium declined by 10.9% in CK, slightly declined in C4S6 with no more than 5%, slightly increased in NPK by 1.3%, and increased in C7S3 by 22.4%. Overall, the application of straw returning to replace some potassium fertilizer was suitable for the soil in karst peak-cluster depression, as it could not only maintain the yield of spring maize, but also sustain potassium dynamic balance. And 60% of the straw potassium substitution could be more suitable for sustaining potassium balance, while 30% of the straw potassium substitution could be more beneficial to improve soil slowly available potassium.
Keywords: straw returning; substitution effect; Karst peak-cluster depression; potassium balance; maize yield

我国土壤全钾含量为 0.5~25 g·kg^{-1}，而我国耕地中缺钾土壤总面积高达 0.23 亿 hm^{2}[1]。近年来，由于农业生产复种指数提高和高产优质品种的推广，使得土壤钾素随农作物收获被大量带出，造成我国土壤钾素亏缺面积逐年扩大，农田钾素亏缺已成为农业生产持续发展的限制因素之一。刘艳等[2]研究发现，在喀斯特峰丛洼地不同土地利用方式土壤中尽管速效钾含量较高，为 136.28~198.10 mg·kg^{-1}，但全钾含量仅为 3.59~6.05 g·kg^{-1}。张伟等[3]研究发现施肥是促进喀斯特地区土壤钾素积累的有效措施。

钾在农作物产量形成、保障作物高产、稳产和提升农产品品质等多方面起着极其重要和不可替代的作用。农作物秸秆含有丰富的钾素资源，约占秸秆干物质量的 1.5%[4]。随着人们对资源高效利用认识的深入，秸秆还田水平正在不断提高，国内外在秸秆还田对作物产量及土壤钾素影响方面的研究也取得了丰硕的成果[5]。前人[6-7]通长期定位试验研究发现，在施用氮磷肥基础上，长期施用钾肥或秸秆还田均能显著增加小麦(*Triticum aestivum* L.)和玉米(*Zea mays* L.)产量，而且保持农田土壤钾素平衡，改善耕层土壤钾素状况。谢佳贵等[8]研究结果显示秸秆还田结合施用钾肥不仅可以提高玉米产量、增加养分吸收总量，还有利于土壤钾素的收支平衡，提高土壤速效钾含量，对维持土壤钾素肥力的稳定具有重要的作用。王宏庭等[9]连续 16 年的定位试验研究表明，增施钾肥和秸秆还田是作物增产和保持钾素肥力的重要措施，使土壤速效钾和缓效钾分别比初始值提高 38.6%和 11.0%。Liao 等[10]在水稻土中的研究也表明，秸秆还田能够提高土壤缓效钾含量。Li 等[11]在水稻土上研究表明秸秆还田可以提高土壤速效钾含量，有利于耕地质量的提高；并且秸秆还田在水稻土中可以不同程度地替代化学钾肥[12]。

以往研究秸秆还田效应多是在化肥氮磷钾投入量一定基础上再施用秸秆还田，而在氮磷钾元素投入量一定的前提下，利用秸秆中所含钾素替代化肥钾的研究较少。本研究利用中国科学院环江喀斯特试验站的长期定位试验，研究秸秆还田等量替代化肥钾的效应，以期为在喀斯特峰从洼地探讨秸秆还田替代化肥钾的可行性及合适的秸秆替代量提供数据支持。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

长期试验样地位于中国科学院环江喀斯特生态系统观测研究站(24°43′~24°45′N, 108°18′~108°20′E)，属中亚热带季风气候区，多年平均气温为 19.9 ℃，年均≥10 ℃积温为 6 300 ℃，无霜期 300~330 d。年均降雨量 1 400 mm，其中 4—8 月为雨季，降雨量占全年的 70%以上，9 月至次年 3 月为旱季。年平均日照 1 400 h，平均太阳总辐射量 400 kJ cm^{-2}，其中有效辐射量为 200 kJ cm^{-2}。研究区为典型的峰丛洼地景观，发育基岩为白云岩，地势四周高，中间低，最高点海拔 647.2 m，最低点海拔 262 m。发育土壤主要为棕色石灰土，土层厚 30~200 cm。

1.2 试验设计

长期定位试验样地建立于 2006 年，采用随机区组，设置 6 种施肥处理方式，每个处理 4 次重复。小区间用厚 20 cm 的水泥板间隔，水泥板埋深不低于 50 cm，每个小区大小为 4 m×7.5 m。种植作物为玉米/大豆(*Glycine max*)套作，大豆通常在玉米收获前 20 天左右套种在玉米行两侧，作物品种一旦确定，至少 3 物品年保持不变。样地开垦前植被为草丛，优势种为臭蒿(*Artem isia hedinii*)、蔓生莠竹(*Microstegium vagans*)等。本研究选取其中 4 个处理，分别为：①CK,不施肥处理；②NPK：无机肥施用处理，施用的无机肥分别为尿素、钙镁磷肥和氯化钾，玉米每季 N、P_2O_5、K_2O 施用量分别为 200.0 kg ·hm^{-2}、90.0 kg ·hm^{-2} 和 120.0 kg ·hm^{-2}；

③C7S3: 70%NPK+30%秸秆还田(按钾素计算，不足 30%的 NP 用无机肥补充，肥料总量与处理②相同，下同)；④C4S6: 40%NPK+60%秸秆还田(按钾素计算，不足 60%的 NP 用无机肥补充)。

本文选取 2010—2014 年的研究数据，期间玉米品种为‘瑞单 8 号’，行距为 1 m，株距为 50 cm。氮肥和钾肥均按 3∶2 方式分 2 次施用，基肥穴施，追肥点施后覆盖；磷肥作为基肥 1 次施用。中耕、除草及病虫害防治按常规进行。

表 1　2006 年各处理部分土壤理化性质

Table 1　Partial physical and chemical properties in different treatments in 2006 before the experiment

处理 Treatment	有机质 Organic matter ($g \cdot kg^{-1}$)	全氮 Total nitrogen ($g \cdot kg^{-1}$)	速效钾 Rapidly available potassium (mg·kg–1)	缓效钾 Slowly available potassium (mg·kg–1)
CK	43.9±1.9	2.12±0.05	87±6.3	187.2±2.2
NPK	45.3±5.8	2.21±0.05	76.8±5.3	204.4±16.1
C7S3	39.5±3.9	2.04±0.06	77.1±5.1	177.2±9.2
C4S6	44.3±2.1	2.15±0.06	81.1±9.0	198.2±13.6

CK: 不施肥处理; NPK: 无机肥处理; C7S3: 70%NPK+30%秸秆还田处理; C4S6: 40%NPK+60%秸秆还田处理。CK: no fertilizer; NPK: chemical fertilizer; C7S3: 70% chemical fertilizer and 30% straw; C4S6: 40% chemical fertilizer and 60% straw.

1.3　样品采集与测定

按照国家生态系统研究网络(CERN)的监测要求，土壤样品于 2010—2014 年玉米收获期采集，每个小区随机采集 8 个耕作层土样(0~20 cm)，组成一个混合样品，风干，过 20 目筛，待测定养分用。作物产量于玉米收获期考种而得，玉米收获期，每个小区各取植株样品 10 株为一个混合样，人工脱粒，烘干，计算作物产量，秸秆烘干计算秸秆量。采用常规分析方法测定土壤有效钾、缓效钾、植物样品氮、磷、钾等[13]。

1.4　计算与分析方法

主要计算公式[14-16]:

钾素收获指数(%)=成熟期单位面积籽粒钾素吸收量/植株钾素总吸收量×100

钾回收率(KRE, recovery efficiency, %)=(施钾区地上部吸钾量–无钾区地上部吸钾量)/施钾量×100

钾素吸收利用率(KA_bE, absorption efficiency, %)=(施钾区作物籽粒吸钾量–无钾区作物籽粒吸钾量)/施钾量×100

钾肥农学利用率(KAE, agronomic efficiency, $kg \cdot kg^{-1}$)=(施钾区产量–无钾区产量)/施钾量

钾肥偏生产力(KPFP, partial factor productivity , $kg \cdot kg^{-1}$)=施钾肥区产量/施钾量

土壤养分表观平衡($kg\ hm^{-2}$)=有机和化学肥料投入总量–作物养分吸收量

钾素平衡系数=投入土壤中的钾/带出土壤中的钾

钾素实际平衡率(%)=(输入钾–支出钾)/支出钾×100

其中玉米植株养分含量以 2010—2014 年各小区测定的平均值计算。植株养分吸收量依据作物籽粒和秸秆历年产量均值计算，本研究不考虑通过种子、作物根茬、枯枝落叶、降水等途径进入土壤的钾素及流失的钾素含量。

本研究以 2010—2014 年监测数据为基础，采用 Microsoft Excel 2010 和 DPS 分别对数据进行作图和统计分析。

2　结果与分析

2.1　秸秆还田替代化肥钾对玉米产量的影响

作物产量是评价肥料施用效果和土地生产能力的重要参数。从图 1a 可以看出，施用肥料使喀斯特峰丛洼地春玉米产量呈逐年增长趋势，不施肥处理的产量有下降趋势。统计分析显示，施肥处理春玉米产量极显著高于不施肥处理($P<0.01$)，且 5 年平均产量是不施肥处理的 4.12~4.17 倍；秸秆还田替代化学钾肥处理(C7S3, C4S6)产量与全化肥处理(NPK)产量无显著差异($P>0.05$)，且分别是 NPK 处理的 98.3%, 98.7%。从 5 年产量变化来看，在喀斯特峰丛洼地以秸秆还田替代部分化肥钾的施肥措施是可行的。

同玉米产量类似，施肥处理均极显著提高玉米秸秆生物量($P<0.01$)，并随施肥年限延长呈增长趋势(图 1b)。从 5 年秸秆生物量均值来看，C4S6 处理和 NPK 处理年均量相当(分别为 602.7 $g \cdot m^{-2}$、602.9 $g \cdot m^{-2}$)，C7S3

处理年均量略高，为 624.5 g·m^{-2}，但施肥处理间无显著差异(P>0.05)。由此可见，秸秆还田替代部分化肥钾在提高玉米秸秆生物量作用上与单施化肥相当。

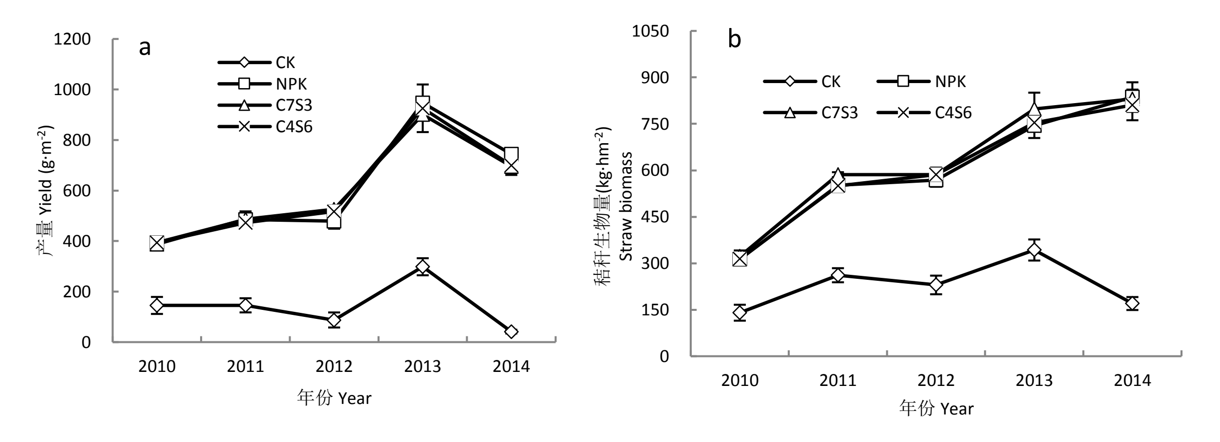


图 1　不同施肥处理对峰丛洼地玉米产量(a)和秸秆生物量(b)的影响

Fig. 1　Grain yields (a) and straw biomass (b) of maize under different fertilizer treatments

CK：不施肥处理; NPK：无机肥处理; C7S3: 70%NPK+30%秸秆还田处理; C4S6: 40%NPK+60%秸秆还田处理。CK: no fertilizer; NPK: chemical fertilizer; C7S3: 70% chemical fertilizer and 30% straw; C4S6: 40% chemical fertilizer and 60% straw.

2.2　长期秸秆还田替代化肥钾对玉米营养元素吸收的影响

从表 2 看出，施肥使玉米秸秆中含钾量极显著高于不施肥处理(P<0.01)，是 CK 处理的 2.21~2.53 倍；并且无论是施用化肥还是部分秸秆还田替代化肥均提高了玉米籽粒中钾素含量，其中 NPK 处理达到显著水平(P<0.05)。分析 5 年监测数据，在棕色石灰土上施用化肥及化肥配施秸秆均可提高玉米秸秆及籽粒钾素吸收量，并达到极显著水平(P<0.01)。说明在喀斯特峰丛洼地秸秆还田替代部分化肥钾对玉米吸钾量的影响与单施化肥的水平相当。

表 2　不同施肥处理对玉米钾素吸收量的影响

Table 2　Effect of straw returning on K uptake by maize

处理 Treatment	含钾量 K content (g·kg^{-1})		5 年年均钾吸收量 Average K uptake (kg·hm^{-2})			钾素收获指数(%) K harvest index
	秸秆 Straw	籽粒 Grain	秸秆 Straw	籽粒 Grain	总量 Total	
CK	4.28±0.72B	5.38±0.54b	9.80±3.40B	7.73±5.21B	17.53	41.2a
NPK	9.92±0.65A	6.12 ±0.72a	59.81 ±20.00A	37.32±14.05A	97.13	38.6a
C7S3	10.84±0.41A	5.96±0.57ab	65.45 ±21.41A	35.72±12.04A	101.17	38.5a
C4S6	9.47±0.08A	5.93±0.52ab	57.11±18.52A	35.69±12.63A	92.80	35.6a

CK：不施肥处理; NPK：无机肥处理; C7S3: 70%NPK+30%秸秆还田处理; C4S6: 40%NPK+60%秸秆还田处理。钾素含量为 2010 和 2012 年的平均值。同列数据后不同大写字母表示处理间差异达 1%极显著水平，同列不同小写字母表示处理间差异达 5%显著水平。CK: no fertilizer; NPK: chemical fertilizer; C7S3: 70% chemical fertilizer and 30% straw; C4S6: 40% chemical fertilizer and 60% straw. The data of potassium content is average of 2010 and 2012. Values followed by different capital letters in a column are significant among treatments at the 1% level and the different lowercases indicate significant at the 5% level.

图 2 显示，随着施肥年限的延长，玉米籽粒对氮、磷元素的吸收均呈现增长趋势，不施肥处理玉米籽粒中氮磷元素含量在这 5 年中呈现下降趋势。对 5 年玉米吸收氮、磷元素均值比较发现，施肥处理能极显著提高玉米籽粒中氮、磷元素含量(P<0.01)，施肥处理间无显著变化(P>0.05)。由此可见，从玉米籽粒养分吸收情况看，秸秆还田可以替代部分化学钾肥在喀斯特峰丛洼地施用。

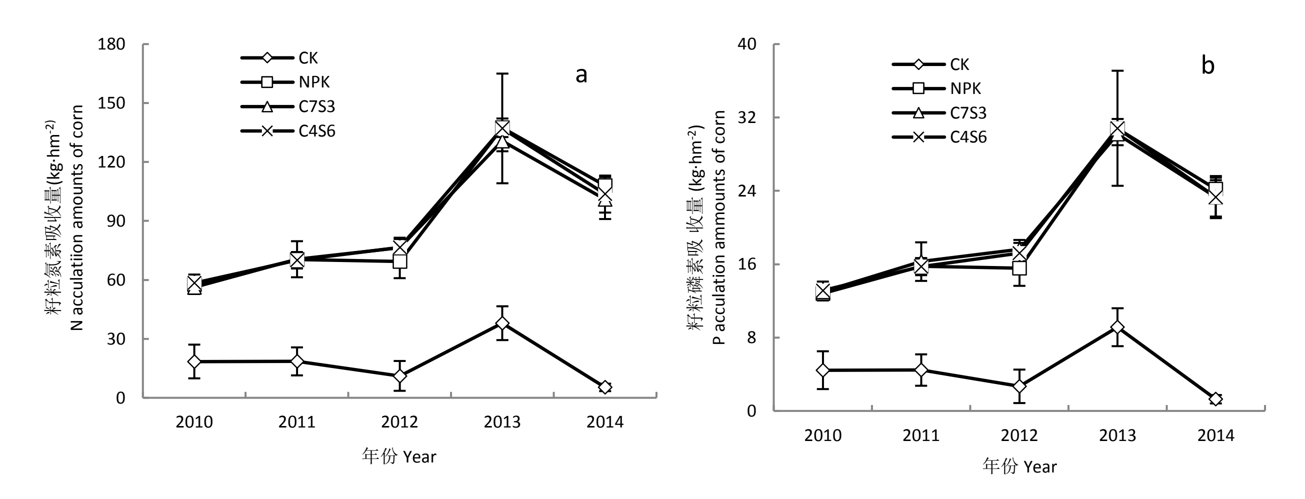


图 **2** 不同施肥处理玉米籽粒对氮**(a)**、磷**(b)**元素吸收量随年限的变化

Fig. 2 The uptake of N (a) and P (a) by maize in different fertilizer applications

CK: 不施肥处理; NPK: 无机肥处理; C7S3: 70%NPK+30%秸秆还田处理; C4S6: 40%NPK+60%秸秆还田处理。CK: no fertilizer; NPK: chemical fertilizer; C7S3: 70% chemical fertilizer and 30% straw; C4S6: 40% chemical fertilizer and 60% straw.

2.3 秸秆还田替代部分化肥对春玉米钾肥利用率的影响

表 3 表明，在钾素回收率，钾素吸收利用率，钾肥农学利用率以及钾肥偏生产力方面，秸秆还田替代部分钾肥处理与全量化肥处理间均无显著差异(P>0.05)，说明秸秆还田替代部分钾肥对玉米利用钾素的效率没有影响。

表 **3** 秸秆还田替代部分化肥对春玉米钾肥利用率的影响**(2010—2014)**

Table 3 Effect of the straw returning on K utilization of spring maize

处理 Treatment	回收率 (%) KRE	吸收利用率 (%) KA_bE	农学利用率 (kg·kg^{-1}) KAE	偏生产力 (kg·kg^{-1}) KPFP
NPK	79.9a	29.7a	3.88a	61.2a
C7S3	84.0a	28.1a	3.80a	60.2a
C4S6	75.6a	28.1a	3.82a	60.4a

CK: 不施肥处理; NPK: 无机肥处理; C7S3: 70%NPK+30%秸秆还田处理; C4S6: 40%NPK+60%秸秆还田处理。同列不同小写字母表示处理间差异达 5%显著水平。CK: no fertilizer; NPK: chemical fertilizer; C7S3: 70% chemical fertilizer and 30% straw; C4S6: 40% chemical fertilizer and 60% straw. Values followed by different lowercases indicate significant differences at 5% level.

2.4 秸秆还田替代部分化肥对土壤钾素表观平衡的影响

通过分析 2010—2014 年钾素年均表观盈亏量来看(表 4)，施肥各处理钾素表观盈亏量无显著差异(p>0.05)。NPK 处理年均钾盈余量为 3.00 kg·hm^{-2}，高于 30%秸秆替代量处理(–1.90 kg·hm^{-2})，而 60%秸秆替代化肥钾处理钾素年均盈余量最大(8.22 kg·hm^{-2})，实际平衡盈余率为 7.4%。由此可见，30%秸秆量替代化肥在短时期内可以保持玉米相对高产，维持土壤钾素相对平衡；60%秸秆量替代化肥处理可以在保持玉米相对高产的同时，使土壤中的钾素得到补充，使土壤钾保持动态平衡；全量化肥处理目前也处于钾素盈余状态。

表 **4** 施肥对玉米季钾素表观平衡的影响**(2010-2014)**

Table 4 Effect of fertilizer application on potassium apparent balances

处理 Treatment	钾肥投入量 Input of K (K_2O, kg·hm^{-2})	作物钾移走量 Plant K removal (K_2O, kg·hm^{-2})	钾素表观盈亏量 Surplus of K(K_2O, kg·hm^{-2})	钾素平衡系数 K balance index	钾实际平衡率 Surplus of K (%)
CK	0	21.1b	–21.1b	0.00	–100

NPK	120	117.0a	3.00a	1.03	2.6
C7S3	120	121.9a	–1.9 0a	0.98	–1.5
C4S6	120	111.8a	8.22a	1.07	7.4

CK: 不施肥处理; NPK: 无机肥处理; C7S3: 70%NPK+30%秸秆还田处理; C4S6: 40%NPK+60%秸秆还田处理。同列不同小写字母表示处理间差异达 5%显著水平。CK: no fertilizer; NPK: chemical fertilizer; C7S3: 70% chemical fertilizer and 30% straw; C4S6: 40% chemical fertilizer and 60% straw. Values followed by different lowercases indicate significant differences at 5% level.

2.5 秸秆还田替代部分化肥对土壤表层速效钾和缓效钾含量的影响

经过 8 年定位试验, 各处理表层土壤(0~20cm)速效钾含量与试验初期(2006 年)有一定差异, 不施肥处理土壤速效钾含量有所下降, 2014 年下降了 15.9%。施肥处理极显著增加了土壤中速效钾含量(P<0.01), 其中 NPK 处理增加最多, 是 2006 年的 3.36 倍; C7S3 和 C4S6 处理中, 2014 年速效钾含量分别是 2006 年的 2.78 和 2.37 倍。分析 2010—2014 年数据(图 3), 施肥处理土壤速效钾含量极显著高于不施肥处理(P <0.01), 其中 5 年年均含量大小依次为: NPK>C7S3>C4S6, 但各处理差异不显著(P>0.05)。由此可见, 施肥是提高喀斯特峰丛洼地土壤速效钾含量的有利措施, 施用化肥能保持土壤速效钾含量较高, 秸秆替代化肥土壤速效钾略低(C7S3 和 C4S6 处理分别是 NPK 处理的 95.6%和 85.5%)。

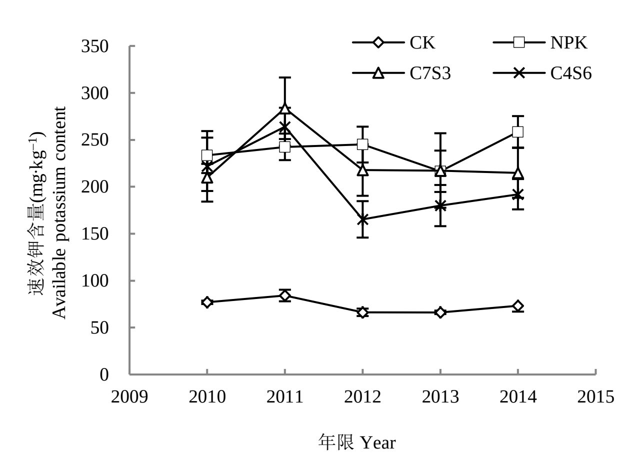


图 **3** 不同施肥处理对土壤速效钾的影响

Fig. 3 Effect of different fertilizer application on the rapidly available potassium content

CK: 不施肥处理; NPK: 无机肥处理; C7S3: 70%NPK+30%秸秆还田处理; C4S6: 40%NPK+60%秸秆还田处理。CK: no fertilizer; NPK: chemical fertilizer; C7S3: 70% chemical fertilizer and 30% straw; C4S6: 40% chemical fertilizer and 60% straw.

作物吸收的钾主要来自土壤速效钾, 而土壤缓效钾是土壤速效钾的补充。从图 4 可以看出, 经过 8 年耕作后, 不施肥处理缓效钾呈下降趋势, 降幅为 10.9%, 60%秸秆还田替代钾肥处理缓效钾有所下降, 但降幅不超过 5%(为 4.9%); 化肥 NPK 处理缓效钾基本持平, 增幅 1.3%, 30%秸秆还田 C7S3 处理增幅较大, 为 22.4%。因此, 平衡施用化肥及化肥配施秸秆还田能基本维持土壤缓效钾的含量, 并且 30%的秸秆还田量更有利于土壤缓效钾的积累。

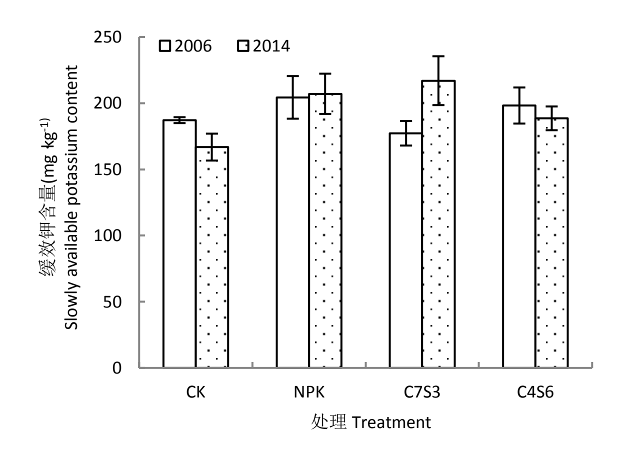


图 **4** 不同施肥处理土壤缓效钾含量随时间的变化

Fig. 4 Effect of different fertilizer application on the slowly available potassium content

CK: 不施肥处理; NPK: 无机肥处理; C7S3: 70%NPK+30%秸秆还田处理; C4S6: 40%NPK+60%秸秆还田处理。CK: no fertilizer; NPK: chemical fertilizer; C7S3: 70% chemical fertilizer and 30% straw; C4S6: 40% chemical fertilizer and 60% straw.

3 讨论

许多研究表明，化肥配以秸秆还田能提高作物产量，增加作物生物量。徐永刚等[17]在东北棕壤上的研究结果显示秸秆还田配施 NPK 肥能显著提高玉米籽实和秸秆产量。周怀平等[18]研究长期秸秆还田对黄土区旱地玉米产量的影响，发现秸秆覆盖或粉碎还田均具有显著的增产增收效果。高洪军等[19]在东北黑土的研究结果表明长期秸秆还田配施 NPK 肥使玉米产量显著高于不施肥处理，而和 NPK 处理差异不显著。本研究在喀斯特棕色石灰土上得出了类似的结论,秸秆还田配施化肥处理与单施化肥处理产量相当，施肥均极显著提高春玉米产量(图 1a，约是 NPK 肥产量的 98%)。张亚杰等[20]在喀斯特地区的研究也表明，与不施肥 CK 相比，施肥能有效增加玉米秸秆生物量和籽粒产量，而秸秆还田配施化肥处理秸秆生物量显著高于只施化肥处理。本研究中秸秆替代钾肥还田处理与化肥 NPK 处理无显著差异。本研究中 30%秸秆替代钾肥还田量处理(C7M3)年均产秸秆量最高，同 40%的化肥钾处理(C4M6)相比, 70%的化肥钾(C7M3)可能更能满足玉米前期生长对钾素的需求，与 100%化肥钾处理(NPK)相比, 30%的秸秆还田使玉米生育后期仍保持有较多的钾素供应。

养分吸收量是作物生物量形成的基础，它的高低影响作物经济产量及肥料利用效率。谢佳贵等[8]在东北黑土上的研究结果表明施钾肥和秸秆还田可以提高玉米秸秆和籽粒氮、磷、钾的吸收总量，并且秸秆还田结合钾肥处理对促进玉米氮、磷、钾等养分吸收与积累的效果最好。本研究在喀斯特峰丛洼地也发现施肥能显著提高玉米秸秆和籽粒对土壤氮、磷、钾元素的吸收，并且随种植年限延长呈增长趋势，但 3 种等量施肥处理间无显著差异。并且分析结果显示玉米钾素回收率，钾素吸收利用率，钾肥农学利用率和钾肥偏生产力这几个指标，在 3 种施肥处理中均无显著差异，说明秸秆还田在喀斯特峰丛洼地可以代替部分化学钾肥保持玉米的产量及肥料利用率。

农田生态系统中养分平衡的盈亏是决定土壤养分水平消长的根本原因，因此，农田养分平衡是判断土壤养分水平发展趋向的根本依据[21]。李玉影等[22]在东北玉米主产区研究表明，在最佳施肥处理下，氮、磷的平衡系数分别为 0.92、1.06，养分收支状况较为平衡，而钾素的平衡系数仅为 0.42，远小于 1，处于严重亏缺状态。谢佳贵等[8]研究结果显示单施化肥 NPK 处理钾素年均亏缺量为 25.4 kg·hm^{-2}，平衡系数为 0.78，低于试验地区土壤钾素允许平衡盈亏率，短期内可以维持土壤钾素平衡；而秸秆还田结合化肥处理钾素年均盈余量为 22.8 kg·hm^{-2}，平衡系数为 1.18，土壤钾素有盈余。王志勇等[23]在低肥力土壤上试验结果显示秸秆还田配以 NPK 肥处理土壤钾素年均盈余 82.99 kg·hm^{-2}，平衡系数达 1.26, NPK 处理土壤钾素平衡系数为 0.42，处于严重亏缺状态。本研究中 NPK 化肥处理，秸秆替代 30%化肥钾处理(C7M3)和秸秆替代 60%化肥钾处理(C4M6)5 年年均钾素平衡系数分别为 1.03、0.98 和 1.07，表明在喀斯特峰丛洼地以秸秆还田替代部分化肥钾可以维持玉米季土壤养分平衡。

土壤速效钾含量常被用来评价土壤钾对当季作物的有效性。本研究中, 2010~2014 年土壤速效钾含量年际间基本持平或略有降幅。而与试验初期相比, 不施肥处理速效钾含量有下降趋势, 3 种施肥处理中均有显著的提高。谢佳贵等[8]在黑土上通过 3 年试验研究结果显示, 与试验初期相比, NPK 处理速效钾含量下降了 1.31%, NPK+秸秆还田处理有所提高。王志勇等[24]在潮土上的研究结果显示, 与试验初期相比, NPK 和 NPK+秸秆还田处理短期内均能提高表层土壤速效钾含量。本研究 8 年试验后, NPK 和秸秆还田部分替代化肥钾处理表层速效钾含量均有显著提高, 说明在喀斯特峰丛洼地石灰土上, 平衡施用化肥及秸秆替代部分化肥均能提高土壤速效钾含量, 从而在短期内能保证植物对钾素的吸收。

而在评价土壤钾对作物的长期有效性时, 则不仅要考虑速效钾的水平, 更要注意非交换性钾(即缓效钾)的贮量及其释放速率[25]。孙丽敏等[6]在潮土上的研究结果表明, 施用 NPK 肥及 NPK+秸秆还田处理 17 年平均土壤缓效钾含量较基础值分别提升 10.13%和 7.15%, 说明在无外源钾投入情况下, 土壤缓效钾补充土壤速效钾而供作物吸收利用; 化肥处理中土壤缓效钾保持相对平稳, 可能是外源化肥钾投入基本能满足作物对钾素的需求, 使土壤缓效钾与速效钾保持动态平衡; 60%秸秆还田替代化肥处理中土壤缓效钾基本保持相对平衡, 而 30%秸秆还田替代化肥处理使缓效钾提升了 22.4%, 这说明并非秸秆还田量越多对土壤缓效钾积累越有利, 但造成此结果的原因有待进一步研究。

4 结论

本试验在氮磷钾元素投入量一定的前提下, 研究部分秸秆还田替代化学钾肥对玉米产量、钾素利用效率、钾素表观平衡以及土壤钾素养分的变化情况。目前得出结论如下:

1)通过分析 2010—2014 年玉米产量及秸秆生物量来看, 在喀斯特峰丛洼地, 施肥极显著提高玉米产量及秸秆生物量, 并在短期内均呈现逐年增长趋势; 而秸秆还田替代部分化肥钾处理与 NPK 化肥处理间无显著差异。

2)随着施肥年限的延长, 施肥处理中玉米籽粒对氮、磷元素的吸收均呈现增长趋势, 施肥处理能极显著提高玉米籽粒中氮、磷和钾元素含量($P<0.01$), 施肥处理间无显著变化($P>0.05$)。

3)5 年年均数据显示, 在玉米钾素回收率, 钾素吸收利用率, 钾肥农学利用率以及钾肥偏生产力方面, 秸秆还田替代部分钾肥处理与 NPK 处理间均无显著差异($P>0.05$)。

4)从钾素表观平衡分析, C7S3 在短时期内可以维持土壤钾素相对平衡; C4S6 使土壤中的钾素得到补充, 使土壤钾保持动态平衡; 纯化肥 NPK 处理目前也处于钾素盈余状态。

5)从土壤钾素养分含量来看, 施用化肥 NPK 能保持土壤速效钾含量较高, 秸秆替代部分化肥使土壤速效钾略低, 均极显著高于不施肥处理; 平衡施用化肥及化肥配施秸秆还田能基本维持土壤缓效钾的含量, 并且 30%的秸秆还田量更有利于土壤缓效钾的积累。

综上所述, 在喀斯特峰丛洼地以秸秆还田替代部分化肥钾的施肥措施是可行的, 能维持钾素动态平衡, 并且 30%的秸秆钾还田量更有利于土壤缓效钾的积累。

参考文献 References

[1] 张会民, 徐明岗, 等. 长期施肥土壤钾素演变[M]. 北京: 中国农业出版社, 2008.
Zhang H M, Xu M G, et al. Evolution of potassium in soils of China under long-term fertilization[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2008.

[2] 刘艳, 宋同清, 蔡德所, 等. 喀斯特峰丛洼地不同土地利用方式土壤肥力特征[J]. 应用生态学报, 2014, 25(6): 1561-1568.
Liu Y, Song T Q, Cai D S, et al. Soil fertility characteristics under different land use patterns in depressions between karst hills[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2014, 25(6): 1561- 1568

[3] 张伟, 陈洪松, 苏以荣, 等. 不同作物和施肥方式对新垦石灰土土壤肥力的影响[J]. 土壤通报, 2013, 44(4): 925-930.
Zhang W, Chen H S, Su Y R, et al. Effects of reclamation and fertilization on calcareous soil fertility in the initial period of cultivation[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2013, 44(4): 925-930.

[4] 李书田, 金继运. 中国不同区域农田养分输入、输出与平衡[J]. 中国农业科学, 2011, 44(20): 4207- 4229.
Li S T, Jin J Y. Characteristics of Nutrient Input/Outputand Nutrient Balance in Different Regions of China[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2011, 44(20): 4207- 4229.

[5] 姜超强，郑青松，祖朝龙．秸秆还田对土壤钾素的影响及其替代钾肥效应研究进展[J]．生态学杂志, 2015, 34(4): 1158-1165.

Jiang Z Q, Zheng Q S, Zu C L. Research progress on effects of straw returning on soil potassium and its substitute for potassium fertilizer[J]. Chinese Journal of Ecology, 2015, 34(4): 1158-1165.

[6] 孙丽敏，李春杰，何萍，等．长期施钾和秸秆还田对河北潮土区作物产量和土壤钾素状况的影响[J]．植物营养与肥料学报, 2012, 18(5): 1096 -1102.

Sun L M, Li C J, He P, *et al*. Effects of long-term K application and straw returning on crop yield and soil K status in fluvo-aquic soil of Hebei Province[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2012, 18(5): 1096 - 1102.

[7] 谭德水，金继运，黄绍文，等．灌淤土区长期施钾对作物产量与养分及土壤钾素的长期效应研究[J]．中国生态农业学报, 2009, 29(9): 4967-4975．

Tan D S, Jin J Y, Huang S W, *et al*. Effect of long-term potassium application on irrigated soil potassium and on the yield and nutrient of crops[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2009, 17(4): 625-629.

[8] 谢佳贵，侯云鹏，尹彩侠，等．施肥和秸秆还田对春玉米产量、养分吸收及土壤钾素平衡的影响[J]．植物营养与肥料学报, 2014, 20(5): 1110-1118.

Xie J G, Hou Y P, Yin C X, *et al*. Effect of potassium application and straw returing on spring maize yield, nutrient absorption and soil potassium balance[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2014, 20(5): 1110-1118.

[9] 王宏庭，金继运，王斌，等．山西褐土长期施钾和秸秆还田对冬小麦产量和钾素平衡的影响[J]．植物营养与肥料学报, 2010, 16(4): 801-808．

Wang H T, Jin J Y, Wang B *et al*. Effects of long-term potassium application and wheat straw return to cinnamon soil on wheat yields and soil potassium balance in Shanxi[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2010, 16(4): 801-808.

[10] Liao Y L, Zheng S X, Nie J, *et al*. Long-term effect of fertilizer and rice straw on mineral composition and potassium adsorption in a reddish paddy soil[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2013, 12: 694-710.

[11] Li J F, Lu J W, Li X K, *et al*. Dynamics of potassium release and adsorption on rice straw residue[J]. Plos One, 2014, 9(2):e90440.

[12] 李继福，鲁剑巍，任涛，等．稻田不同供钾能力条件下秸秆还田替代钾肥效果[J]．中国农业科学, 2014, 47(2): 292-302.

Li J F, Lu J W, Ren T, *et al*. Effect of straw incorporation substitute for K-fertilizer under different paddy soil K supply capacities[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2014, 47(2): 292-302．

[13] 鲁如坤．土壤农业化学分析方法[M]．北京：中国农业科技出版社, 2000.

Lu R K. Method on Agricultural Soil Chemical Analysis[M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2000

[14] 黄晓婷，赵亚丽，杨艳，等．不同土壤类型小麦-夏玉米轮作施肥效应[J]．中国农业科学, 2016,49(16):3140-3151.

Effects of Fertilization on Winter Wheat-Summer Maize Rotation System in Different Soil Types[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2016, 49(16):3140-3151.

[15] 傅伟，刘坤平，陈洪松，等．等氮配施有机肥对喀斯特峰丛洼地农田作物产量与养分平衡的影响[J]．中国生态农业学报, 2017, 25(6): 812-820.

Fu W, Liu K P, Chen H S, *et al*. Effect of partial replacement of inorganic N with organic manure on crop yield and soil nutrient balance in arable ecosystem in karst peak-cluster depression[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2017, 25(6): 812-820.

[16] 彭正萍，刘亚男，李迎春，等．持续氮素调控对小麦/玉米轮作系统氮素利用和表观损失的影响[J]．水土保持学报, 2015, 29(6): 74-79.

Peng Z P, Liu Y N, Li Y C, *et al*. Effects of constant nitrogen regulation on the nitrogen utilization and apparent loss in the rotation system of wheat and maize[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2015, 29(6): 74-79.

[17] 徐永刚，马强，周桦，等．秸秆还田与深松对土壤理化性状和玉米产量的影响[J]．土壤通报, 2015, 46(2):428- 432

Xu Y G, Ma Q, Zhou H, *et al*. Effects of Straw Returning and Deep Loosening on Soil Physical and Chemical Properties and Maize Yields [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2015, 46(2): 428- 432.

[18] 周怀平，谢文艳，关春林，等．长期秸秆还田对旱地玉米产量、效益及水分利用的影响[J]．植物营养与肥料学报, 2013, 19(2): 321-330.

Zhou H P, Xie W Y, Guan C L, *et al*. Effect of long-term straw-returning on corn yield, economic benefit and water use in arid

farming areas[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2013, 19(2): 321-330.

[19] 高洪军，彭畅，张秀芝，等. 长期秸秆还田对黑土碳氮及玉米产量变化的影响[J]. 玉米科学, 2011, 19(6):105-107,111.

Gao H J, Peng C, Zhang X Z, *et al*. Effect of long-term straw returning field on the carbon and nitrogen in black soil and maize yield[J]. Journal of Maize Sciences, 2011, 19(6):105-107,111.

[20] 张亚杰，邓少虹，李伏生，等. 喀斯特地区春玉米套作夏大豆下作物产量和农田碳贮量对有机肥与化肥配施的响应[J]. 南方农业学报, 2015, 46(9): 1584-1590

Zhang Y J, Deng S H, Li F S, et al. Effect of organic manure and chemical fertilizer combined application on crop yield and field carbon storage under spring maize intercropped with summer soybean in karst region[J]. Journal of Southern Agriculture, 2015, 46(9): 1584-1590

[21] 鲁如坤，刘鸿翔，闻大中，等. 我国典型地区农业生态系统养分循环和平衡研究 Ⅴ. 农田养分平衡和土壤有效磷、钾消长规律[J]. 土壤通报, 1996, 27(6): 241-242.

Lu Ｒ K, Liu H X, Wen D Z *et al.* Nutrient cycle and balance of agroecosystem in the typical regions of China V. Correlation between nutrients balance and ebb and flow of soil available P and K[J]. Chinese Journal of Soil Science, 1996, 27(6): 241-242

[22] 李玉影，刘双全，姬景红，等. 玉米平衡施肥对产量、养分平衡系数及肥料利用率的影响[J]. 玉米科学, 2013, 21 (3):120-124.

Li Y Y, Liu S Q, Ji J H, *et al*. Effect of balanced fertilization on yield, nutrient balance coefficient and fertilizer use efficiency of corn[J]. Journal of Maize Sciences, 2013, 21(3): 120-124.

[23] 王志勇，白由路，杨俐苹，等. 低土壤肥力下施钾和秸秆还田对作物产量及土壤钾素平衡的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2012, 18(4): 900-906.

Wang Z Y, Bai Y L, Yang L P, *et al*. Effects of application of potassium fertilizer and straw returning on crop yields and soil potassium balance in low-yielding fields[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2012, 18(4): 900-906.

[24] 王志勇，白由路，高进华，等. 秸秆还田与施钾对华北低产潮土区作物产量及土壤钾素的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2013, (2): 46-50.

Wang Z Y, Bai Y L, Gao J H, et al. Effect of straw returned to soil and application of potassium fertilizer on crops yield and soil potassium in the low fertility of efluvo-aquic soil in North China[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2013, (2): 46-50.

[25] 金继运. 土壤钾素研究进展[J]. 土壤学报, 1993, 30(1):94-101.

Jin J Y. The advance of soil potassium[J]. Acta Pedologica Sinica, 1993, 30(1): 94-101.